

Рис. 6. Напряжения по высоте сечения внешнего армирования в элементах типа 1, 2, 3 при нагрузке $F=120$ кН

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988.– 200 с.

2. ТКП 45-5.03-16-2005. Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования. – Мн.: Минстройархитектуры, 2006.– 76 с.

Материал поступил в редакцию 10.01.08

DRAGAN V.I., LUGOVSKOJ M.A., MUCHIN A.V. Is intense - is deformed a condition steel of ferro-concrete bent elements with the rigid external fixture with various kinds of anchor of devices

The technique of carrying out of laboratory researches of bending steel-concrete elements with rigid external reinforcement is described in this paper. The basic results of experimental researches are also presented, comparison and the analysis of experimental results for elements with different types of anchor devices is executed.

At tests of all types of steel-concrete elements the marginal state of elements occurs as a result of reaching a yield point and evolution of plastic deformations of the lower area of rolling elements.

The received experimental data testify that anchor devices in the form of L-bars involve in combined action in bending a reinforced-concrete kernel of an element while in the elements which do not have similar anchor devices, external reinforcement and a reinforced-concrete kernel work in bending practically independently from each other.

УДК 624.014.001.24 (476.7)

Драган В.И., Люстибер В.В.

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ СТРУКТУРНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМЫ «БргТУ»

Введение. В связи с внедрением в практику строительства абсолютно нового узлового соединения структурных конструкций – узла системы «БргТУ», после возведения ряда объектов с применением в качестве покрытий таких пространственных конструкций проводились их натурные испытания. Кроме того, в лаборатории Брестского государственного технического университета постоянно проводились экспериментальные испытания отдельных узловых элементов при их различном напряженно-деформированном состоянии. Полученные данные подтвердили высокую надежность узлового соединения системы «БргТУ» и выявили ряд преимуществ данного узла по сравнению с известными узловыми соединениями структур. Однако, несмотря на полученные данные, для возведения уникальных сооружений, например, таких как покрытие Летнего амфитеатра в г. Витебске, требуются уточнения и проведение дальнейших исследований действительной работы пространственных конструкций системы «БргТУ».

Были проведены экспериментально-теоретические исследования опытного фрагмента структуры системы «БргТУ». Испытания фрагмента проводились на участке силового пола в лабораторных условиях.

Цель исследований – разработка рекомендаций по расчету структурных конструкций системы «БргТУ» для практического применения при проектировании.

Задачи исследований:

- проверка правильности метода расчета, применяемого при определении напряженно-деформированного состояния структур системы «БргТУ»;
- определение характера предельного состояния структурных конструкций системы «БргТУ»;
- исследование напряженно-деформированного состояния фрагмента металлической структурной плиты с узлами системы «БргТУ»;
- изучение влияния податливости узловых соединений системы

Люстибер Вадим Викторович, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета. Беларусь, БргТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

«БрГТУ» на напряженное состояние и деформации опытного фрагмента;

- определение расчетных длин стержневых элементов, входящих в состав конструкций системы «БрГТУ».

1. Методика проведения испытаний. Исследование напряженно-деформированного состояния структур системы «БрГТУ» выполнялось на опытном фрагменте высотой 1,555м с размерами в плане в осях опор 6,6х6,6м и 4,4х4,4м поверху (рис. 1). Размер ячеек верхней и нижней поясной сеток 2,2х2,2м. Стержневые элементы изготовлены из круглых стальных бесшовных горячекатаных труб сечением 60х4мм по ГОСТ 8732 из стали марки ст.20 по ГОСТ 1050. Узловой элемент имеет следующие характеристики:

- наружный диаметр сферы $D=212\text{мм}$;
- толщина стенки сферы $t=16\text{мм}$;
- болты М30 класса прочности 12.9 по DIN 933;
- высокопрочные гайки М30 по DIN 934 из стали марки 40Х;
- материал сферы и сферических шайб – сталь марки 09Г2С по ГОСТ 19282.

Для данного фрагмента выполнено две группы испытаний, отличающихся расположением опор:

I вариант – шарнирное опирание на четыре крайних угловых узла нижней поясной сетки (рис. 2, а);

II вариант – шарнирное опирание на два крайних угловых узла по одной стороне нижней поясной сетки плюс шарнирное опирание на два средних узла по противоположной стороне нижней поясной сетки (рис. 2, б).

Опытную конструкцию загружали двумя сосредоточенными силами, приложенными к двум центральным узлам нижней поясной сетки. Таким образом, при анализе напряженно-деформированного состояния квадратного в плане фрагмента необходимо учитывать наличие всего лишь одной оси симметрии. Усилие на узлы передавалось с помощью траверс и тяжей. Нагружение осуществлялось гидравлическими домкратами ДГ-50 грузоподъемностью 500кН. Нагрузка на конструкцию измерялась с помощью динамометра, установленного в раму совместно с гидравлическим домкратом, последовательно включенным в гидравлическую цепь нагружения. Давление в домкратах создавалось передвижной насосной станцией.



Рис. 1. Общий вид опытного фрагмента

При нагружении измеряли вертикальные перемещения нижних узлов конструкции и выгиб наиболее нагруженного стержневого элемента, который в дальнейшем терял устойчивость. Для определения усилий измерялись фибровые деформации в отдельных поперечных сечениях некоторых наиболее характерных стержней поясных сеток и раскосов.

Общие деформации измеряли прогибомерами, фибровые деформации – тензорезисторами с базой 20мм. По фибровым деформациям определяли фибровые напряжения, затем вычисляли продольные осевые усилия в стержнях.

Количество сечений по длине стержня и количество тензорезисторов в каждом из поперечных сечений стержней изменялось в зависи-

мости от варианта опирания испытываемого фрагмента. Так, для первого варианта опирания относительные деформации измерялись в четырех наиболее нагруженных стержнях (рис. 2, а). При этом на каждом из этих стержней тензорезисторы наклеивались в трех сечениях: в середине сечения и на расстоянии 100мм от торцов (рис. 3).

При проведении второй группы испытаний (опирание экспериментального фрагмента по второму варианту) все стержни, в которых измерялись относительные деформации, были условно разбиты на три группы. Первая группа – стержень, теряющий устойчивость. В этом элементе в каждом из трех поперечных сечений (в начале, в середине и в конце стержня) наклеивалось по восемь тензорезисторов (рис. 4). Вторая группа стержней – сжатые стержни. В этих элементах в каждом из двух сечений по краям стержня наклеивалось по четыре тензорезистора. Третья группа – растянутые стержни. В этих элементах тензорезисторы наклеивались в сечении, расположенном в середине стержня.

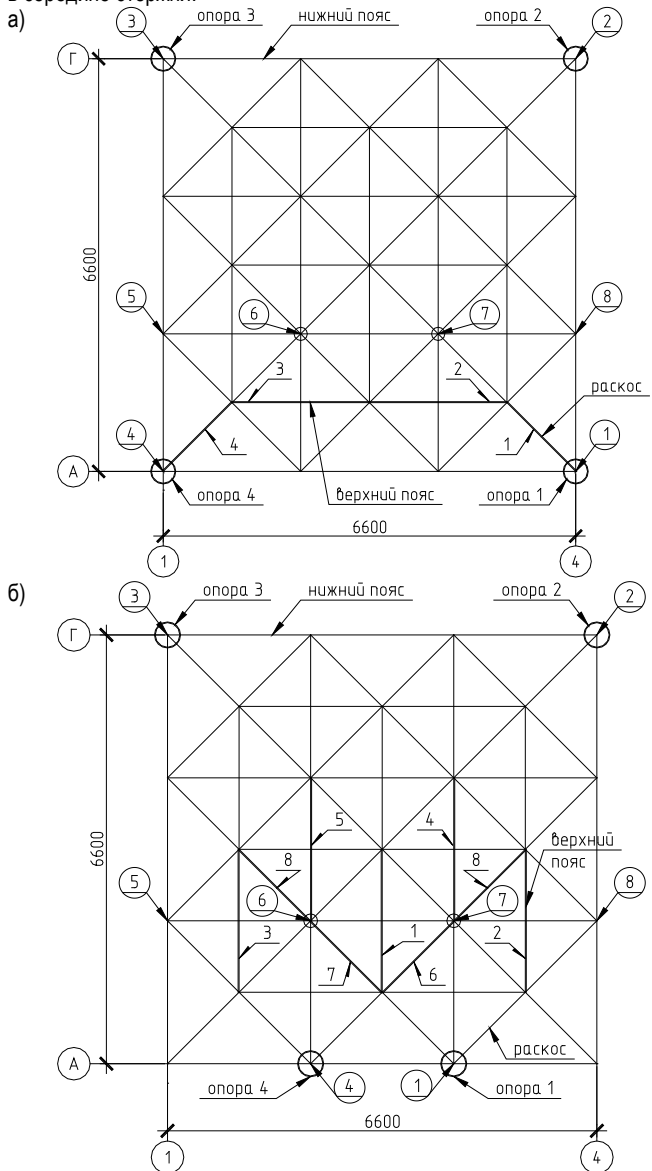


Рис. 2. Опирание опытного фрагмента: а) – на четыре крайних узла (вариант I); б) – на два крайних узла и два средних узла (вариант II)

Условные обозначения:

- 1 – номер стержня с измеряемыми фибровыми деформациями;
- 4 – номер узла с измеряемыми вертикальными перемещениями.

Примечание: испытательная нагрузка прикладывалась в узлах 6 и 7.

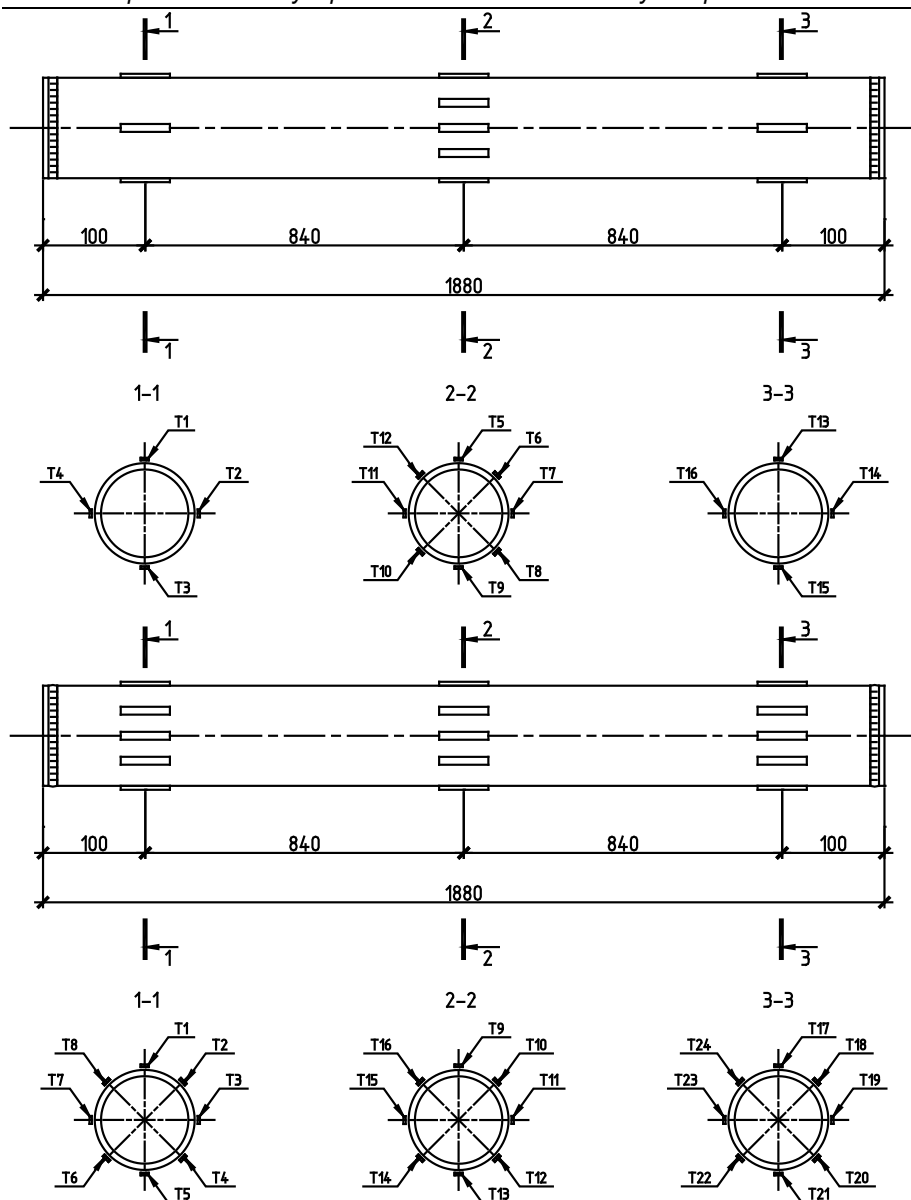


Рис. 3. Расположение тензорезисторов на поверхности стержневых элементов при проведении первой группы испытаний

Рис. 4. Расположение тензорезисторов на поверхности стержневого элемента, теряющего устойчивость, при проведении второй группы испытаний

Положение в пространстве плоскости, в которой стержневой элемент терял устойчивость, определялась следующим образом. На расстоянии 5 мм от поверхности трубы натягивались резиновые нити, проекции которых на поверхность разбивали ее на восемь равных сегментов. Нагружение фрагмента велось до достижения в стержне, теряющем устойчивость, усилия, равного $0,5N_{пред}$. После каждой ступени нагружения, составляющей $0,05N_{пред}$, измерялось расстояние между резиновой нитью и поверхностью трубы. Далее производилась разгрузка фрагмента, и все действия повторялись еще два раза, для подтверждения достоверности расположения в пространстве принятой плоскости потери устойчивости. После этого выполнялась установка прогибометров в центре стержня и по его торцам.

Кроме того, при проведении испытаний по второму варианту опирания (II группа испытаний) в стержнях, где регистрировались деформации с помощью тензорезисторов, параллельно фиксировались деформации с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм. На растянутых стержнях устанавливалось по одному индикатору, на сжатых стержнях – по четыре индикатора.

2. Экспериментально-теоретические исследования работы фрагмента структуры системы «БрГТУ». Первый этап испытаний направлен на выявление общего характера работы системы под нагрузкой. Экспериментальные данные сопоставлены с результатами

расчета модели, выполненного с помощью расчетного комплекса Лира 9.2 при аналогичных граничных условиях и соответствующих нагрузках.

При создании расчетной схемы фрагмента структуры учитывалось предположение о работе стержней модели только на растяжение-сжатие. В связи с этим стержневые элементы структурной плиты описаны универсальным пространственным конечным элементом с тремя степенями свободы в узлах. Граничные условия представлены закреплением всех опорных узлов модели от смещений по вертикали, и двух узлов от смещений в горизонтальной плоскости.

Первая группа испытаний включала в себя три отдельных нагружения опытного фрагмента, вторая – четыре отдельных нагружения. Нагрузка прикладывалась поэтапно с шагом 20 кН до достижения узловой нагрузки значения 80 кН, и далее с шагом 5 кН до достижения предельного состояния одним из элементов фрагмента структуры. Во всех трех случаях первой группы испытаний предельным состоянием являлась потеря устойчивости сжатого опорного раскоса (рис. 5, а). При этом каждый раз стержень терял устойчивость в одной и той же плоскости. При проведении второй группы испытаний терял устойчивость сжатый стержень верхней поясной сетки (рис. 5, б). За начало потери устойчивости принимался момент, когда выгиб стержня нарастал без дальнейшего увеличения узловой нагрузки.

Результаты первой и второй группы испытаний сведены в таблицу 1 и представлены в виде следующих величин:

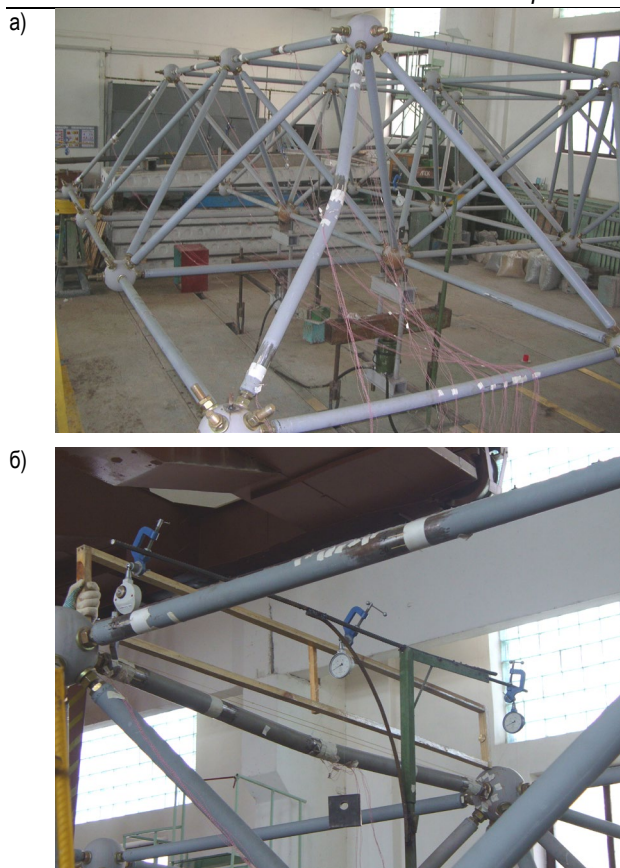


Рис. 5. Потеря устойчивости сжатого стержня:

а) опорного раскоса; б) стержневого элемента верхней поясной сетки

1. Предельное усилие в стержне экспериментальной модели $N_{пред}^{эксп}$, измеренное в момент потери устойчивости.
2. Предельное усилие для центрально сжатого стержня, рассчитанного на устойчивость по формуле Эйлера:

$$N_{кр} = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu \cdot l)^2}, \quad (1)$$

где $E = 2,06 \cdot 10^4 \text{ кН} / \text{см}^2$ – модуль упругости стали;

$J = 27,73 \text{ см}^4$ – момент инерции круглой трубы сечением 60x4мм;
 $l = 220 \text{ см}$ – расстояние между центрами узлов;
 $\mu = 1$ – коэффициент приведения расчетной длины для центрально-сжатого стержня с шарнирно закрепленными концами.

Для опытного фрагмента выполнять расчет допускается по формуле Эйлера, так как при гибкости $\lambda \geq 100$ сталь трубы работает упруго. Стержни испытываемой структуры имеют гибкость, равную:

$$\lambda = \frac{\mu \cdot l}{i} = \frac{1 \cdot 220 \text{ см}}{1,98 \text{ см}} \approx 111 \quad (2)$$

3. Расчетное усилие в стержне $N_{(F=F_{пред}^{эксп})}^{теор}$, полученное в расчетной модели опытного фрагмента при моделировании шарнирных узлов. При этом величина узловой нагрузки, задаваемой в расчетной схеме, соответствует экспериментальной нагрузке на фрагмент в момент потери устойчивости стержня.
4. Экспериментальный коэффициент расчетной длины стержня $\mu_{эксп}$.

В результате испытаний установлено следующее.

Усилия в стержнях, при которых происходила их потеря устойчивости, во всех случаях хорошо соответствовали усилию, рассчитанному как для центрально сжатого стержня по формуле Эйлера (2.1). При этом всегда имело место превышение экспериментального усилия над усилием по Эйлеру. Различие в величинах этих усилий находится в пределах 7,7-19,7% для опорного раскоса, и в пределах 9,4-31,6% для сжатого стержня верхней поясной сетки (табл. 1). Полученный экспериментально коэффициент расчетной длины, как для опорного раскоса, так и для элемента верхней поясной сетки, во всех случаях принимает значение несколько меньше 1 ($\mu_{эксп} < 1$).

Измеренные усилия в стержнях и рассчитанные по принятой расчетной модели хорошо соответствуют друг другу. Для стержней верхнего пояса расхождение экспериментальных и расчетных значений составляет всего $\pm 5\%$. Для опорных раскосов эта разница изменяется в пределах 6,1-20,4%, что можно объяснить неодинаковыми опорными реакциями фрагмента структуры.

При проведении первой группы испытаний установлено, что для всех стержневых элементов, в которых выполнялись измерения напряжений, зависимость усилий от нагрузки линейная. Аналогичная зависимость, как для сжатых, так и для растянутых стержней, была подтверждена при проведении второй группы испытаний (рис 6).

Таблица 1. Измеренные и рассчитанные значения предельных усилий в момент потери устойчивости стержня

Номер испытания	Предельное усилие в стержне, кН			Запасы несущей способности конструкции структуры		Коэффициент приведения расчетной длины, $\mu_{эксп}$
	измеренное, $N_{пред}^{эксп}$	рассчитанное по формуле Эйлера, $N_{кр}$	теоретическое в расчетной модели, $N_{(F=F_{пред}^{эксп})}^{теор}$	соотношение $\frac{N_{пред}^{эксп}}{N_{кр}}$	соотношение $\frac{N_{пред}^{эксп}}{N_{(F=F_{пред}^{эксп})}^{теор}}$	
1	2	3	4	5	6	7
1	126	117	113	1,08	1,12	0,96
2	136	117	113	1,16	1,20	0,93
3	140	117	132	1,20	1,06	0,91
4	140	117	147	1,20	0,95	0,91
5	143	117	139	1,22	1,03	0,90
6	154	117	160	1,32	0,96	0,87
7	128	117	131	1,09	0,98	0,96

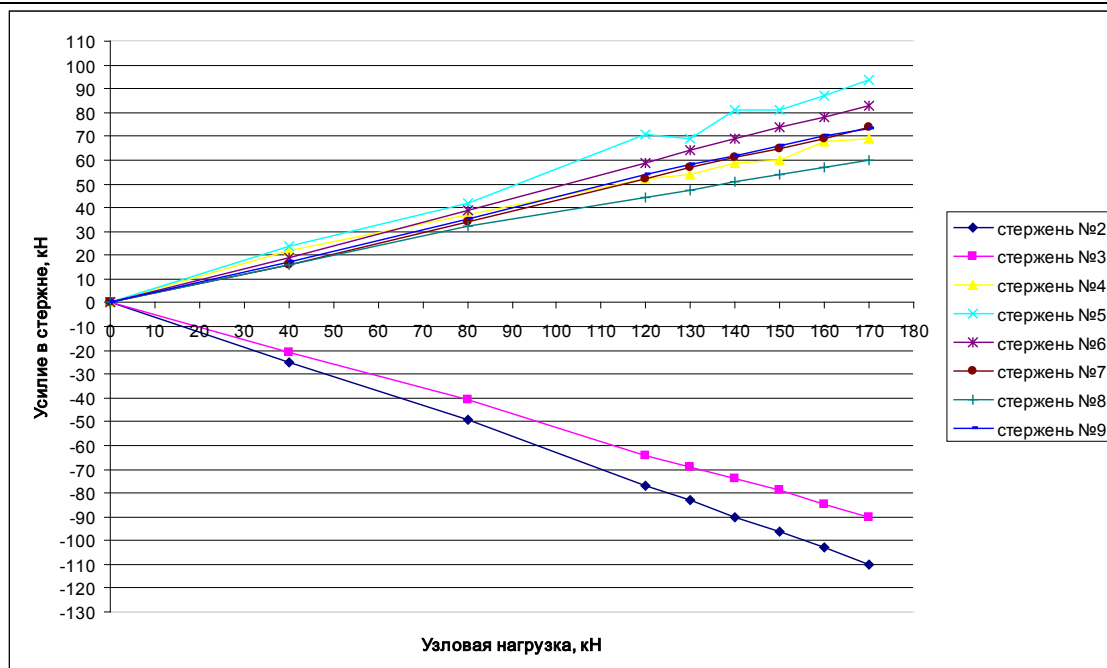


Рис. 6. Усилия в стержнях при проведении испытания №7

Таблица 2 Экспериментальные и теоретические прогибы опытного фрагмента

Группа испытаний	Испытание №	Точка №	Величина прогиба, мм		Разница, %
			экспериментальная	теоретическая	
1	2	3	4	5	6
I	1	8	8.07	5.9	36.8
		7	12.79	9.11	40.4
		6	12.27	9.11	34.7
		5	7.64	5.9	29.4
	2	8	7.61	5.9	29.1
		7	12.50	9.11	37.2
		6	11.29	9.11	23.9
		5	7.52	5.9	27.5
	3	8	9.09	6.88	32.1
		7	14.15	10.62	33.2
		6	13.34	10.62	25.6
		5	8.40	6.88	22.1
II	4	8	9.94	8.06	23.3
		7	12.55	9.69	29.5
		6	12.00	9.69	23.8
		5	9.44	8.06	17.1
	5	8	9.46	7.63	23.9
		7	11.78	9.18	28.3
		6	11.23	9.18	22.3
		5	9.24	7.63	21.1
	6	8	10.38	8.48	22.4
		7	13.05	10.2	27.9
		6	12.77	10.2	25.2
		5	10.36	8.48	22.2
	7	8	8.32	7.2	15.5
		7	10.74	8.7	23.4
		6	10.49	8.7	20.5
		5	8.15	7.2	13.2

Примечание: расположение точек указано на рис. 2

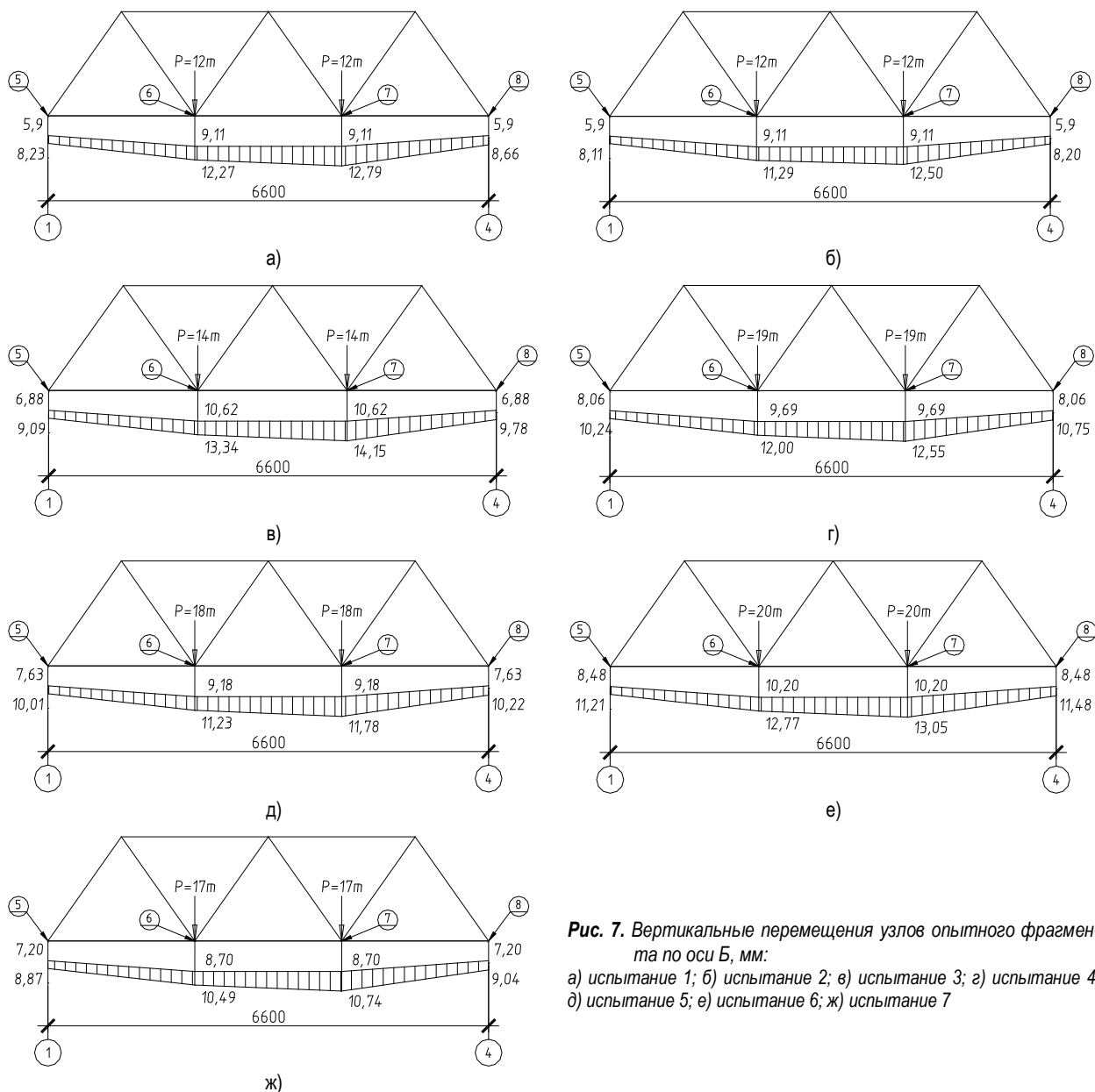
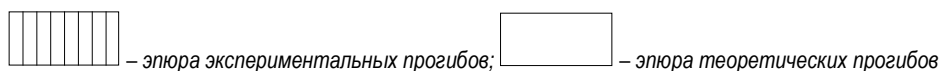


Рис. 7. Вертикальные перемещения узлов опытного фрагмента по оси Б, мм:
 а) испытание 1; б) испытание 2; в) испытание 3; г) испытание 4;
 д) испытание 5; е) испытание 6; ж) испытание 7

Условные обозначения:



Сравнение рассчитанных и измеренных усилий, полученных при проведении первой группы испытаний, показало превышение экспериментальных усилий над расчетными только для третьего стержня в первом испытании. При этом разница не превысила 3%. Необходимо отметить, что расхождения в усилиях имеют максимальные значения на начальной стадии нагружения и значительно уменьшаются при приближении к моменту наступления предельного состояния фрагмента.

Сравнение теоретических и экспериментальных усилий, полученных при испытании фрагмента с опорами, расположенными по второму варианту, подтвердили закономерность, установленную при проведении первой группы испытаний. В одном из сжатых стержней верхней поясной сетки наблюдается превышение экспериментальных усилий над теоретическими величиной 10–13% в течение всех этапов нагружения. В другом сжатом элементе данное соотношение изменяется на противоположное и сохраняется на уровне 6%. Подобная ситуация наблюдается для растянутых стержней нижней поясной сетки. После последнего этапа нагружения разница усилий достигает 16% (расчетные больше экспериментальных) и 14% (экспериментальные больше

расчетных). В раскосах разница сравниваемых величин принимает как положительные значения с преобладанием расчетных усилий (до 21%), так и отрицательные значения (до 20%).

Очень малые, но имеющие место различия в величинах экспериментальных и теоретических усилий, могут быть объяснены объективно присутствующими погрешностями измерений и некоторой идеализацией расчетной модели.

Характер деформированного состояния опытного фрагмента на стадии нагружения, предшествующей потере устойчивости стержня, соответствует расчетным условиям. При этом во всех испытаниях наблюдается превышение экспериментальных прогибов над расчетными (табл. 2) и незначительная асимметрия в эпюре прогибов (рис. 7). Наибольшая разница в величинах сравниваемых прогибов (40,4%) получена при проведении первого испытания. При проведении последующих испытаний наблюдалось постепенное приближение измеряемых прогибов к расчетным, а для седьмого испытания максимальное расхождение снизилось до величины 23,4%. Максимальное отличие реальных вертикальных перемещения от своих теоретических значений в большей степени характерно для узлов, к которым

прикладывалась нагрузка. Увеличение прогибов на начальных этапах нагружения непропорционально увеличению нагрузки. Однако при значении узловой нагрузки $P = (0,25 - 0,35) \cdot P_{пред}$ устанавливается линейная зависимость, которая сохраняется вплоть до потери устойчивости наиболее нагруженным стержнем.

Проблема превышения экспериментальных прогибов над теоретическими исследовалась в работе [3] и связывалась с узловой податливостью. Ранее было решено принимать податливость как возможные деформации, обусловленные начальной работой узлового элемента, либо его работой под нагрузкой. В данном случае деформациями, вызванными работой узла под нагрузкой, можно пренебречь. Это объясняется тем, что максимальное усилие, прикладываемое к узлам, для которых измеряются вертикальные перемещения, не превышает 80кН. В то же время в [3] установлено, что для узлового элемента с толщиной стенки сферы равной 16мм максимальная величина упругих деформаций составляет: при растяжении не более 1,81мм, при сжатии – 2,1 мм, при уровне нагрузки 550 кН. Таким образом, при усилии $N = +80кН$ упругие деформации сферы составят не более 0,27мм.

Наступление предельного состояния в испытаниях первой группы определялось потерей устойчивости сжатого опорного раскоса, в испытаниях второй группы – потерей устойчивости сжатого стержня верхней поясной сетки. При достижении усилием своего критического значения стержень начинал выгибаться без приращения нагрузки. Давление в домкратах при этом снижалось на 5-10%. В результате потери устойчивости одного из элементов фрагмента происходило перераспределение усилий. При этом потери устойчивости других сжатых элементов, значительных нарушений геометрии пирамид, поворота узлов, изогнутости стержневых элементов и болтов не наблюдалось.

Выводы

1. Характер напряженно-деформированного состояния опытного фрагмента структуры системы «БрГТУ» соответствует результатам, полученным для его расчетной схемы, моделирующей шарнирное сопряжение стержней в узлах. Предельное состояние фрагмента структуры системы «БрГТУ» наступает в результате потери устойчивости одного из наиболее нагруженных стержневых элементов. Во всех испытаниях потеря устойчивости стержня происходила при усилии, соответствующем усилию, рассчи-

танному по формуле Эйлера для стержня с шарнирно закрепленными концами. При этом во всех случаях наблюдалось некоторое превышение на 8-32% экспериментального значения $N_{пред}^{эксп}$ по сравнению с критической силой Эйлера $N_{кр}$. При

- расчете длина стержня принималась равной расстоянию между центрами узлов структуры. Таким образом, вполне обоснованным становится утверждение о работе стержней в составе конструкций системы «БрГТУ» только на растяжение-сжатие.
2. Измеренные вертикальные перемещения нижних узлов структуры превышают расчетные в 1,13-1,4 раза. Таким образом, узловая податливость в большей степени влияет на деформативность структуры системы «БрГТУ» и в меньшей степени на распределение усилий в элементах.
 3. Определение внутренних усилий необходимо производить по расчетной схеме с шарнирным сопряжением стержней в узлах. Возможным вариантом учета узловой податливости структур системы «БрГТУ», при проверке конструкций по второй группе предельных состояний, является увеличение прогибов, полученных для модели с шарнирными узлами, в 1,4 раза.
 4. При выполнении проверки на устойчивость сжатых стержневых элементов структур системы «БрГТУ» коэффициент расчетной длины необходимо принимать равным $\mu = 1$. При этом длина стержня принимается равной расстоянию между центрами узлов.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2489 Респ. Беларусь / Драган В.И., Левчук А.А., Шалобыта Н.Н., Пчѐлин В.Н.; заявитель Брестский гос. тех. ун-т.– опубл. 28.02.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006.–№ 1.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81* "Стальные конструкции") // ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. –148 с.
3. Провести теоретические и экспериментальные исследования работы стальных конструкций покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске: отчет о НИР (II этап) / Брестский государственный технический университет; рук. темы В.И.Драган. – Брест, 2007. – 189 с.– № ГР 2007457.

Материал поступил в редакцию 10.01.08

DRAGAN V.I., LUISTIBER V.V. Peculiarities of the work of the structural metal constructions of BrSTU system

The junction of the BrSTU system has an original constructive solution and has a number of advantages in comparison with the junctions of the known metal spatial constructions. Despite the conducted real experiences of the roofing of the erected objects, numerous experimental and theoretical researches of the deflected mode of separates elements and the whole fragments of the structures of the BrSTU system, there is a number of questions, which demand a more precise and deeper analysis and the necessity of the acknowledgement of the authenticity of the accepted assumptions. The most actual issues are the following: a calculated model of s structural construction, calculated lengths of the rods, the influence of the ductility of the junction on the deflected mode of the construction, the definition of the character of the limiting state of the structure.

The experimental research includes seven separate tests of the fragment of the BrSTU system. The confrontation of the experimental and theoretical values shows quite a high degree of the correspondence of the received results, and their analysis confirms the authenticity of the assumptions accepted for the calculation of the structures of BrSTU system.

УДК 624.014.27(476.7)

Драган В.И., Шурин А.Б.

ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМБИНИРОВАННОГО СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ КОМПЛЕКСА «ВИКТОРИЯ» НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

Введение. Комбинированное структурное покрытие универсального спортивного комплекса «Виктория» разработано на кафедре строительных конструкций УО БрГТУ в 2004 году и представляет собой квадратную в плане структурную плиту, состоящую из двух складок 66 х 66 х 93 м, соединенных в коньке и создающих два ската с уклонами в 15°.

В средней части структурная плита поддерживается двумя металллическими арками пролетом 80,62 м. По контуру она опирается на четыре диафрагмы жесткости и сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6м. Конструкция покрытия более подробно описана в [1, 2].

Шурин Андрей Брониславович, старший преподаватель кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.